

文章编号:0253-9993(2013)08-1388-04

# 瓦斯煤粉耦合体系着火实验研究

李 刚,平 洋,吴卫卫,金 潮,苑春苗

(东北大学 火灾 & 爆炸防治实验室,辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:**为研究煤矿井下瓦斯、煤粉、空气3成分体系的着火特性,在改进的粉尘云最低着火温度测试装置(G-G furnace)内,选取4种煤样进行瓦斯与煤粉耦合条件下的引燃实验研究。实验结果表明:当有煤粉存在时,瓦斯-煤粉-空气3成分耦合体系的最低着火温度(MIT)均低于瓦斯、煤粉的最低着火温度,且煤粉粒径越小、煤粉挥发分越大,耦合体系的最低着火温度下降的越多。 $D_{50} \approx 25 \mu\text{m}$ 的1号煤样使得耦合体系的着火温度比瓦斯低 $340^\circ\text{C}$ ,比煤粉低 $110^\circ\text{C}$ 。说明煤矿井下电气设备按纯的甲烷气体进行防爆温度设计和选型,若不考虑煤粉的影响,具有引燃瓦斯-煤粉-空气3成分耦合体系的风险,需加以完善和改进。

**关键词:**瓦斯;煤粉;耦合体系;最低着火温度

**中图分类号:**TD712.7;TD714.5 **文献标志码:**A

## Experimental study on the ignition of the coupling system of coal gas and coal dust

LI Gang, PING Yang, WU Wei-wei, JIN Chao, YUAN Chun-miao

(Fire & Explosion Protection Laboratory, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** To analyze the ignition characteristics of gas, coal dust and air 3 component system, using the modified minimum ignition temperature of dust cloud test device(G-G furnace), a set of experiments on the minimum ignition temperature of coal gas and coal dust coupled system was conducted in this study. The coal dust samples include brown coal, two types of bituminous coal and a type of anthracite coal. The results show that the minimum ignition temperature(MIT) of the coupling system is lower than that of coal gas and coal dust. Moreover, the higher the volatile matter and the finer the coal dust particles, the lower the MIT of the coupling system. For example, for the No. 1 coal dust sample with  $D_{50} \approx 25 \mu\text{m}$ , the MIT is  $340^\circ\text{C}$  lower than that of coal gas and  $110^\circ\text{C}$  lower than that of coal dust. The study demonstrates that it may not be safe enough to design the allowable temperature of the electrical equipment used in coal mine only based on the MIT of coal gas. This is because of the potential ignition risk due to the presence of coal gas-coal dust coupling system. The actual technical requirements should be improved.

**Key words:** coal gas; coal dust cloud; coupling system; minimum ignition temperature

瓦斯爆炸至今仍是影响煤矿安全生产的重要危险之一。由于井下到处是飞扬的煤粉尘,瓦斯和煤尘通常处于共存状态,因此井下爆炸事故通常是瓦斯、煤尘耦合条件下的杂混物爆炸<sup>[1]</sup>。瓦斯、煤尘耦合着火爆炸特性与单一瓦斯或单一煤尘具有明显不同的特征,20世纪80年代,Engler<sup>[2]</sup>发现煤粉和爆炸下限浓度以下的瓦斯气体混合也会引发爆炸,从而导致不可预期的危险状态。近年来杂混物的爆炸特性引

起了很多研究者的关注,Kenneth L<sup>[3]</sup>发现煤粉和瓦斯混合物的爆炸下限和烃类气体混合物爆炸下限一样,也有符合Le Chatelier定律的特性;Amyotte等<sup>[4]</sup>在26 L球形容器里测试证实瓦斯的引入导致煤粉的爆炸下限和点燃能量明显降低;Amyotte等<sup>[5]</sup>在滴定炉里研究了加入天然气对煤粉着火诱导时间的影响,发现加入体积分数1%的甲烷气体可使低挥发分煤颗粒诱导时间缩短到和同样粒径的高挥发分煤粉相

当的水平。但 Pilao 等<sup>[6]</sup>在 22.7 L 近似球形爆炸容器里测得煤与瓦斯杂混物最大爆炸压力的变化对瓦斯含量并不敏感,只是在体积分数 3.5% 的瓦斯浓度时引起爆炸压力上升速率的增大,Dong Chengjie 等<sup>[7]</sup>经研究也获得了类似的结果。

在煤与瓦斯耦合体系的已有研究文献中,都倾向于关注瓦斯的引入对煤粉爆炸危险性的影响,比如着火是否变得更加敏感,爆炸严重程度是否变大<sup>[8]</sup>。但是很少有人关注煤粉是否会引起瓦斯空气混合物着火敏感性的提高。从量子化学的角度出发,卢楠等<sup>[9]</sup>提出了新的观点:瓦斯煤尘着火爆炸是煤粉先着火引爆了瓦斯,而不是瓦斯引爆了煤粉,这是基于瓦斯的活化能比煤粉高出 100 ~ 200 kJ/mol 得出的,但没有给出相应的实验验证。如果煤粉的存在确实使得瓦斯的着火敏感性增大,则煤矿井下现有防爆电气设备的设计和选型也许需要考虑煤粉的影响<sup>[10]</sup>。

可燃气体的着火敏感性一般用爆炸下限、最小着火能量、最低引燃温度等指标进行描述,本文主要关注最低引燃温度指标,因为该指标是防爆电气设备必须满足的重要指标之一,是确定防爆电气设备温度组别的依据。利用改进的粉尘云最低着火温度测试装置(G-G furnace)研究瓦斯、煤粉、空气混合物的着火温度特性,其目的在于研究煤粉云的存在对于瓦斯最低着火温度的影响,以便更好地理解瓦斯、煤粉、空气 3 成分体系(ternary system)的着火爆炸特性,以期对煤矿井下瓦斯煤尘爆炸事故的预防提供理论参考。

## 1 实验样品、设备及方法

### 1.1 实验样品

#### 1.1.1 煤粉试样

选取一种褐煤(1号)、两种烟煤(2号和3号)、一种无烟煤(4号)4种煤粉进行试验。每种试样分为3个粒径级别,不同煤样同一级别煤粉的粒径分布具有大致相同的规律,以1号煤样为例,其粒径分布见表1,4种煤样的工业分析结果见表2。按照 IEC 1241-2-1<sup>[11]</sup>规定的标准测试方法对4种煤样不同粒径的粉尘云最低着火温度(MIT)进行测试,结果见表2。

#### 1.1.2 瓦斯气样

瓦斯气体主要成分是烷烃,本文采用的瓦斯气样为甲烷、乙烷和丙烷的混合物,各成分所占的体积分数分别为 80.01%、13.97% 和 6.02%。由阿马格体积定律可得瓦斯气体爆炸的化学计量浓度为 8%。在后续的试验中,均按该体积浓度进行配制。

表 1 1 号煤样的粒径分布

粒径/ μm	粒径分布/μm					比表面积/ (m <sup>2</sup> · cm <sup>-3</sup> )
	D <sub>3</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>97</sub>	
0 ~ 63	14.991	17.202	24.167	40.539	51.115	0.268
63 ~ 74	43.429	50.274	69.974	98.628	117.833	0.099
74 ~ 154	69.582	77.775	103.365	148.849	179.150	0.066

注: D<sub>3</sub> 表示 3% 粒径在该值以下; D<sub>10</sub> 表示 10% 粒径在该值以下, 其他依此类推。

表 2 煤样的工业分析

煤粉	M <sub>ar</sub> / %	A <sub>ar</sub> / %	V <sub>ar</sub> / %	粉尘云最低着火温度/℃		
				D <sub>50</sub> ≈ 25 μm	D <sub>50</sub> ≈ 70 μm	D <sub>50</sub> ≈ 104 μm
				1 号	1.44	19.31
2 号	1.03	14.72	27.81	430	440	460
3 号	1.64	10.68	19.14	500	520	530
4 号	0.47	9.67	13.21	590	620	620

## 1.2 实验装置

实验装置,是在 IEC1241-2-1——1994 推荐的用于测试粉尘云最低着火温度的 G-G 炉基础上改造的,主要的变动是将电磁阀开启储气罐喷粉改为手动进气喷粉,如图 1 所示,该实验装置在原理上类似于 Bayless 采用的滴管炉。炉管内径 38 mm,有效容积 226 mL。储气罐为体积 60 mL 带有刻度的工业注射器,注射器内灌装一定量的瓦斯气体,在 1 ~ 2 s 内均匀地推入到炉内。煤粉放置在注射器前部进气管(内径 10 mm)的水平段,由注射器喷出的瓦斯气体喷入到炉内,假设粉尘在炉管内均匀分散,悬浮粉尘云浓度由粉尘质量比炉管体积计算得到。该装置恒温范围为室温至 700 ℃,控制精度为 ±1 ℃。

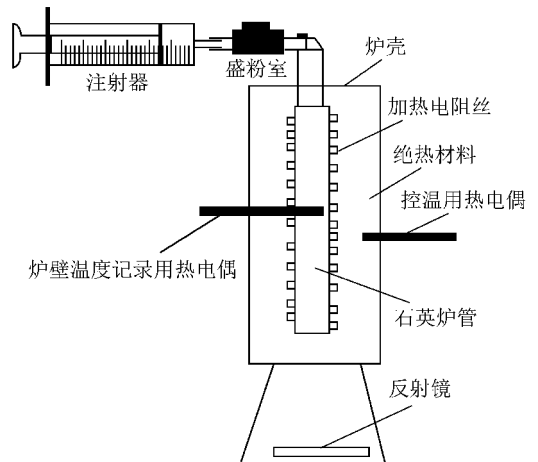


图 1 改进后的粉尘云着火温度测试装置

Fig. 1 Sketch of the modified MIT testing apparatus

### 1.3 实验方法

首先将 G-G 炉炉管内壁升到一定温度,然后在进气管内装入煤粉,注射器内吸入一定量的瓦斯气体,然后以一定的速度推送注射器将瓦斯和煤粉喷入到炉内,通过观察炉管底部或上部是否有火焰产生,从而判定是否发生了着火。若着火,需要降低 G-G 炉的控制温度继续实验;若未着火,则改变粉尘质量,直至连续 10 次未着火,实验终止。实验时温度调整的档距为 5 ℃。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 瓦斯气体在化学计量浓度下的最低着火温度

为了确定煤粉对瓦斯着火的影响,首先需要测试无煤粉时瓦斯气体的最低着火温度。根据前文计算得到的该种瓦斯气体的体积分数(8%)和炉管有效容积(226 mL),利用注射器抽取 18 mL 的纯瓦斯气体,当炉管内壁温度稳定后,将瓦斯气体稳定的喷入到炉内,根据 1.3 节的实验方法,得到化学计量浓度下的该瓦斯气体的最低着火温度为 650 ℃。单纯瓦斯着火形成的火焰如图 2 所示。

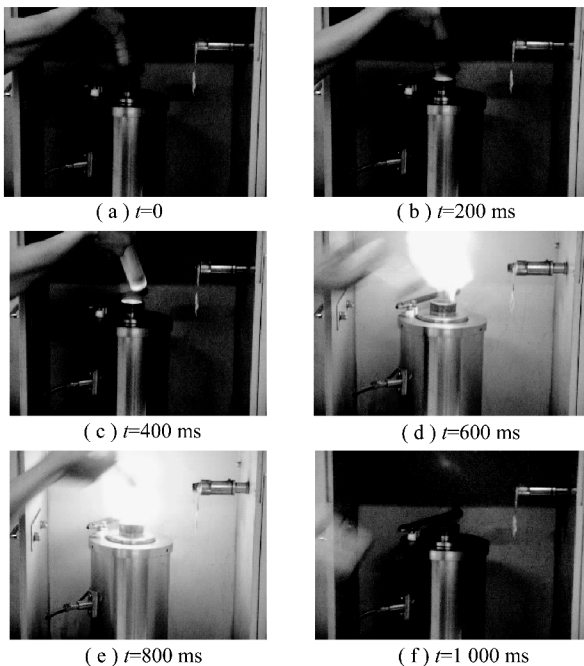


图 2 单纯瓦斯着火过程

Fig. 2 Phenomenon of coal gas ignition

### 2.2 煤粉对瓦斯最低着火温度的影响

当煤粉和瓦斯一起喷入 G-G 炉中着火时,G-G 炉的炉口产生比单纯瓦斯长得多的火焰,且伴有爆鸣声,比单纯瓦斯着火过程猛烈。本文主要关注当有煤粉存在的情况下,瓦斯最低着火温度的变化情况。

### 2.2.1 煤粉浓度对煤粉瓦斯耦合体系着火的影响

选取  $D_{50} \approx 25 \mu\text{m}$  的 1 号煤粉试样,通过称取不同质量的煤粉,改变 G-G 炉内的煤粉粉尘云浓度(0.04 ~ 4.50  $\text{kg}/\text{m}^3$ ),对体积分数 8% 的瓦斯最低着火温度进行测试(图 3)。可见,煤粉的加入导致瓦斯的着火温度明显降低,而且在 0.04 ~ 0.50  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,瓦斯着火温度由无煤粉时的 650 ℃ 迅速降低了一半,在 310 ℃ 左右,该温度比无瓦斯单纯煤粉的最低着火温度 420 ℃ 还低 110 ℃;之后随粉尘浓度的增加,耦合体系的最低着火温度又缓慢上升至 350 ℃ 左右,并在较大煤粉粉尘云浓度范围内基本保持不变。

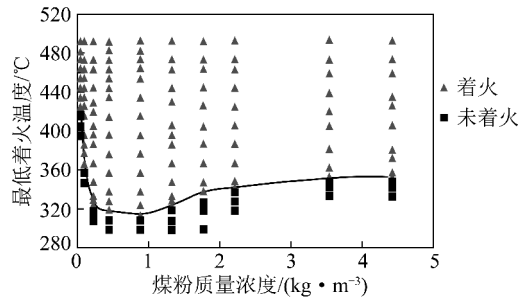


图 3 煤粉浓度对瓦斯最低着火温度的影响

Fig. 3 Effect of coal powder concentration on gas MIT

对 1 号煤样其他粒径的煤粉也进行了测试,发现耦合体系的最低着火温度与  $D_{50} = 25 \mu\text{m}$  的煤粉有相同的规律,其区别在于中位粒径越大,耦合体系的着火温度降低的越少。对 2 号、3 号和 4 号煤样不同浓度对瓦斯最低着火温度的影响实验,也都呈现出和 1 号煤样类似的规律。瓦斯-煤粉-空气最低着火温度比瓦斯和煤粉的最低着火温度都要低的实验结论,与其他学者研究这种 3 成分体系的爆炸下限具有相似性<sup>[12-14]</sup>。不过爆炸下限是分别针对瓦斯或者煤粉而言的,因为瓦斯的下限是体积浓度,而煤粉的下限是悬浮状态的质量浓度,二者不能融合。而最低着火温度却是瓦斯和煤粉共同的环境因素。

### 2.2.2 煤粉挥发分对煤粉瓦斯耦合体系着火的影响

选取  $D_{50} = 25 \mu\text{m}$  的 1 ~ 4 号 4 种煤样进行测试,得到瓦斯最低着火温度和煤样挥发分的关系曲线如图 4 所示。

由表 1 可知,1 ~ 4 号煤样的挥发分逐渐降低,实验测得的瓦斯最低着火温度分别为 315, 365, 435 和 540 ℃,呈现逐渐升高的趋势。1 号和 4 号煤样挥发分含量相差 26.76%,最低着火温度相差 225 ℃。因此,煤粉挥发分含量对耦合体系最低着火温度的影响很大,挥发分含量与耦合体系的最低着火温度成反比。

### 2.2.3 煤粉粒径对煤粉瓦斯耦合体系着火的影响

由图 5 可知,在同种煤样、相同浓度的情况下,煤

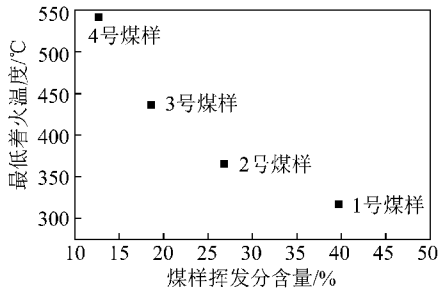


图4 煤样挥发分含量对瓦斯最低着火温度的影响

Fig. 4 Effect of coal volatility on gas MIT

粉粒径越小,耦合体系的最低着火温度越低。煤粉在不同粒径时最低着火温度所对应的最佳煤粉浓度比较接近,只是大粒径煤粉所对应的最小着火温度稍高一些。

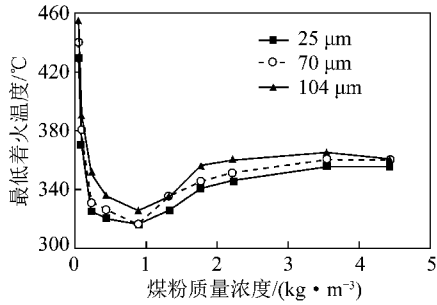


图5 1号煤样粒径对瓦斯最低着火温度的影响

Fig. 5 Effect of No. 1 coal partical size on gas MIT

### 3 结 论

(1)当煤尘和瓦斯一起被喷入上下开口的G-G炉内形成煤-瓦斯-空气3项混合物时,其最低着火温度比单纯的瓦斯和单纯的煤粉都要低,即对于高温热表面瓦斯-煤尘-空气3成分体系比瓦斯-空气和煤尘空气二成分体系的着火敏感性高。

(2)挥发分高、粒径小的煤粉对3成分体系的着火敏感性影响最大, $D_{50} \approx 25 \mu\text{m}$ 的1号烟煤使得瓦斯的最低着火温度降低了一半,为 $310^\circ\text{C}$ 。

(3)现有煤矿井下防爆电气设备的温度组别是按照甲烷的引燃温度来确定的,即防爆电气设备表面的最高温度只要不超过T1组别( $450^\circ\text{C}$ )即满足要求<sup>[15]</sup>,但从实验的结果来看,当生产现场有煤粉存在,瓦斯-煤尘-空气3成分体系的着火温度远低于 $450^\circ\text{C}$ ,因此依据国家标准<sup>[16]</sup>按照甲烷选择煤矿井下防爆电气设备的温度组别存在引燃瓦斯-煤粉-空气3成分体系的风险。

### 参考文献:

[1] 孙继平. 屯兰煤矿“2·22”特别重大瓦斯爆炸事故原因及教训[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 72-75.

Sun Jiping. The causes and lessons of “2·22” gas explosion disaster at Tunlan Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 72-75.

- [2] Engler C. Beitrage zur Kenntniss der Staubexplosionen contributions to knowledge of dust explosions[J]. Chemische Industrie, 1885(S): 171-173.
- [3] Kenneth L Cashdollar. Coal dust explosibility[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9(1): 65-76.
- [4] Bayless D J, Schroeder A R. The effects of natural gas cofiring on the ignition delay of pulverized coal and coke particles[J]. Combustion Sci. and Tech., 1995, 36(1): 36.
- [5] Amyotte P R, Mintz K J, Pegg M J, et al. The ignitability of coal dust-air and methane-coal dust-air mixtures[J]. Fuel, 1993, 72(5): 671-679.
- [6] Pilao R, Ramalho E, Pinho C. Explosibility of cork dust in methane/air mixtures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(1): 17-23.
- [7] Dong Chengjie, Bi Mingshu, Zhou Yihui. Effects of obstacles and deposited coal dust on characteristics of premixed methane-air explosions in a long closed pipe[J]. Safety Science, 2012, 50(9): 1786-1791.
- [8] 毕明树, 李江波. 密闭管内甲烷-煤粉复合爆炸火焰传播规律的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1298-1302.  
Bi Mingshu, Li Jiangbo. Flame propagation of methane-coal dust explosion in closed vessel[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1298-1302.
- [9] 卢楠, 夏荣花, 密士珍, 等. 煤尘对瓦斯爆炸反应影响的量子化学计算研究[J]. 山东师范大学学报, 2008, 37(11): 7-11.  
Lu Nan, Xia Ronghua, Mi Shizhen, et al. Quantum chemical calculation study of effect of coal dust on explosion reaction of mines gas[J]. Shandong Chemical Industry, 2008, 37(11): 7-11.
- [10] 刘丹, 李润之, 司荣军, 等. 瓦斯爆炸诱导沉积煤尘参与爆炸作用模式[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1879-1883.  
Liu Dan, Li Runzhi, Si Rongjun, et al. Pattern of gas explosion induced coal dust explosion[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1879-1883.
- [11] IEC 1241-2-1, Methods for determining the minimum ignition temperature of dusts. Part 2: Dust cloud in a furnace at a constant temperature[S]. International Electrotechnical Commission, 1994.
- [12] 宫广东, 刘庆明, 胡永利, 等. 管道中煤尘爆炸特性实验[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 609-612.  
Gong Guangdong, Liu Qingming, Hu Yongli, et al. Experimental research on methane and coal dust explosion characteristics in tube[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 609-612.
- [13] Dufaud O, Perrin L, Traore M. Dust/vapour explosions: Hybrid behaviours[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, 21: 481-484.
- [14] Amyotte P, Mintz K, Pegg M, et al. The ignitability of coal dust-air and methane-coal dust-air mixtures[J]. Fuel, 1993, 72(5): 671-679.
- [15] 国家安全生产监督管理局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[S]. 2011.
- [16] GB 3836.1—2010, 爆炸性环境第1部分: 设备通用要求[S].